発電機回転子揺らぎによる優勢モード分布の推定とその応用可能性

正員 斎藤 浩海 (東北大)

正員 豊田 淳一 (東北大)

正員 小林 勇二 (東北電力)

Estimation of Dominant Mode Profile by Monitoring Rotor Speed Fluctuations and its Applications

Hiroumi Saitoh, Member, Junichi Toyoda, Member (Tohoku University), Yuuji Kobayashi, Member (Tohoku Electric Power Company)

This paper proposes a new estimation technique of dominant mode profile for dynamic security assessment and stability enhancement of a power system. The mode profile, which describes the distribution of the mode oscillation to the rotor speed responses of all machines, can be obtained by using a newly developed filter, that is, a "Dominant Mode Filter(DMF)". The DMF can be used in detecting the degradation of damping effect of the system and improving the stabilizing ability of a control device such as PSS. The basic concept of the DMF is based on the inherent characteristic of the power system network and the application of principal component analysis to a covariance matrix of the rotor speed fluctuations. The mode profile and the mode energy estimated by the DMF can be used for the following applications. One of them is to use the mode energy and the mode profile for on-line stability monitoring. Another one is a disturbance identifier to find out the location and the severity of a disturbance. The third application is the enhancement of stabilizing ability and adaptability of PSS.

キーワード：回転子速度揺らぎ，優勢モード分布，共分散行列，安定性監視，事故同定，安定化制御信号

1. ま え が き

連系線などの系統内の弱い結合部分における有効電力潮流には，常時微小な揺らぎが観測される。この揺らぎは，ランダムに発生する小さな負荷変動や通常行われている開閉操作などが原因となって生じており，弱制動の固有動揺モード成分を含んでいる。もし，系統構成の大きな変更や想定され得なかった事故の発生によって，PSS(系統安定化装置)などの制動力が低下したとき，弱制動モード，すなわち優勢モードは発散傾向になり，系統を崩壊に導く危険性がある。著者らは，優勢モードのこのような性質に着目し，文献(1)

～(3)において，連系線潮流に観測される揺らぎを常時観測することにより系統の制動力・セキュリティを評価する考え方を提案してきている。

本論文では，優勢モードの各発電機応答における分布状況を，回転子速度に発生している揺らぎからオンラインで推定する方法を提案している。提案手法は，電力ネットワークに固有な性質である同期化力の準対称性と多変量の特徴を抽出するのに有効な主成分分析法に基づいている。推定された優勢モード分布は，系統の安定性診断や安定化制御信号の生成などに応用できる可能性がある。

図1は，提案する優勢モード分布推定法の基本概念

図 1 優勢モード分布推定法の基本構成とその応用可能性

Fig. 1. Basic concept of the DMF and its applications.

構成とその応用方法を示している。図中の破線で囲まれた部分が、モード分布の推定機構を表しており、この部分を本論文では優勢モードフィルタ(Dominant Mode Filter : DMF)と呼んでいる。DMF におけるモード分布推定プロセスは、次のように述べることができる。まず、すべての発電機から回転子速度の時系列データを収集し、揺らぎ成分を抽出する。続いて、揺らぎを各発電機の慣性定数で重み付けした後、共分散行列 R を生成し、その固有値 μ と固有ベクトル u を求める。観測される各固有モードの発電機応答における分布は、固有ベクトル u を慣性定数で重み付けしたベクトル v として得られる。固有値 μ はモード振幅の 2 乗、すなわち振動エネルギーに相当しているの、最終的に優勢モードに対応する分布は、大きな値の μ に対応するベクトル v として同定される。また、この優勢モード分布 v を用いて、回転子速度揺らぎから優勢モード成分 q を抽出するフィルタの係数が容易に求められる。提案する DMF の出力であるモード分布 v 、モードエネルギー μ および優勢モード成分 q は、(1)オンライン安定性監視、(2)事故同定、(3)安定化制御信号の生成に応用可能である。本論文では、これらの DMF の応用可能性を第 4 章において論じている。

2. 定常状態における電力系統の動特性

一般に、電力系統の動特性は、送電網を介した発電機間の電気機械的相互作用と、AVR、ガバナ、PSS などの制御装置の特性に依存している。しかし、定常状態における系統の全域的動特性は、主に電気機械的相互作用によって特徴付けられ、AVR、ガバナ、

図 2 モード分布推定法の説明用系統モデル
Fig. 2. Power system model for explanation of the DMF.

表 1 モデルパラメータから求めた真のモード分布 v

Table 1. Exact mode profiles v obtained from the model parameters.

動揺周波数	0.565 Hz	1.373 Hz	0 Hz
# 1	0.733	0.905	0.577
# 2	0.664	-0.427	0.577
# 3	-0.148	0.004	0.577

PSS などによる制御効果を見無視してもかまわない。従って、系統動特性は、ある運転点回りで線形化した次式の動揺方程式で記述できることになる。

$$\Delta \dot{\delta} = \Delta \omega$$

$$M \Delta \dot{\omega} = -K \Delta \delta + \Delta P \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $\Delta \delta$: 発電機回転子角揺らぎ、 $\Delta \omega$: 回転子角速度揺らぎ、 M : 発電機慣性、 K : 同期化力係数、 ΔP : ランダムな微小じょう乱

いま、固有モードを表す変数ベクトルを q とすれば、次の関係式が導かれる。

$$\Delta \delta = V \cdot q \text{ または } \Delta \omega = V \cdot \dot{q} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 V : 行列 $-M^{-1}K$ の固有ベクトル $v_i (i=1, 2, \dots, m)$ から構成される正方行列

DMF から得られるモード分布は、固有ベクトル v_i を回転子速度揺らぎから推定したベクトルである。すなわち、モード成分 q を抽出するための DMF のフィルタ係数は、行列 V^{-1} の i 番目の行ベクトルに相当している。

図 2 は、DMF のモード分布推定プロセスを説明するための簡略系統モデルを示している。このモデルは、東北一東京連系系統を二つの周期の長いスローモードが保存されるように縮約した線形化モデルである。ただし、制御系は考慮していない。表 1 はモデルパラメータ M と K から解析的に求めた固有ベクトル

v_i , すなわち, 真のモード分布とモードの動揺周波数である。0.565 Hz モードに対応するモード分布は, 発電機#1と#2がこのモードに関して同相かつほぼ同じ振幅で動揺することを示している, #1と#2はコヒーレントである。また, 1.373 Hz モードの分布はこのモードが発電機#3にほとんど観測されず, 発電機#1と#2の電気機械的相互作用に強く依存していることを示している。0 Hz モードは非振動モードである。

3. 優勢モードフィルタの構成法

〈3.1〉 回転子速度揺らぎの共分散行列とモード分布の関係 ここでは, 回転子速度揺らぎの共分散行列 R からモード分布を推定する方法を述べる。提案する推定手法は, 電力系統の特徴である同期化力係数行列 K の準対称性と揺らぎ共分散行列の物理的関係に基づいている。ただし, 本章で論じるモード分布推定法の詳細は文献(4)を参照されたい。

初めに, すべての発電機の回転子角速度 $\omega_i (i=1, 2, \dots, m)$ を同時に観測できると仮定しよう。このとき, Δt でサンプリングされた観測期間 T における回転子角速度の離散データを $\omega_i(k) (k=1, 2, \dots, N)$ とすれば, 揺らぎ成分は次式によって抽出される。

$$\Delta\omega_i(k) = \omega_i(k) - \omega_{\text{coi}}(k) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで, $\omega_{\text{coi}} = \frac{\sum_{i=1}^m M_i \omega_i}{\sum_{i=1}^m M_i}$: 慣性中心における回転子角速度

次に, 角速度揺らぎ $\Delta\omega$ を次式で定義される変量 y に変換する。

$$y = M^{1/2} \Delta\delta \quad \text{または} \quad \dot{y} = M^{1/2} \Delta\omega \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで, $M^{1/2} = \text{diag}[\sqrt{M_i}]$

続いて, 次式に示す揺らぎ共分散行列 R を求める。

$$R = [r_{ij}] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで,

$$\begin{aligned} r_{ij} &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \dot{y}_i(k) \dot{y}_j(k) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\sqrt{M_i} \Delta\omega_i(k) \right] \left[\sqrt{M_j} \Delta\omega_j(k) \right] \end{aligned}$$

行列 R の要素 r_{ij} は, 発電機# i と# j の回転子角速度揺らぎの相関であり, 両者間の回転系における運動エネルギーを意味している。

一般に, 固有動揺モード q_i は次式のように表すことができる。

$$q_i(t) = c_i \cos(\omega_{ri} t + \theta_i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし, ω_{ri} : 固有モード q_i の固有動揺角周波数

パラメータ c_i と θ_i は系統とじょう乱の初期状態に依存しているので, ランダム負荷変動としてじょう乱が印加された場合, c_i と θ_i は揺らぎデータの観測期間 T において確率的に変化する。しかし, 期間 T においてこれらのパラメータがほぼ一定であると仮定すればモード q_i の分布を表す(2)式の行列 V の列ベクトル v_i は, 共分散行列 R の固有ベクトル u_i を用いて次式のように推定できる。

$$v_i = M^{-1/2} u_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし, $M^{-1/2}$: 行列 $M^{1/2}$ の逆行列

また, モード成分 q_i を角速度揺らぎ $\Delta\omega$ から抽出するための DMF のフィルタ係数は, (7)式と R の固有ベクトル u の正規直交性⁽⁶⁾ から次のように求めることができる。

$$u_i^t M^{1/2} (= v_i^t M) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし, t : 転置

従って, 次式によってモード成分 q_i を回転子角速度揺らぎ $\Delta\omega$ から抽出できることになる。

$$\dot{q}_i = u_i^t M^{1/2} \Delta\omega \quad \dots\dots\dots (9)$$

ところで, 共分散行列 R の固有値 μ は, 次式のように近似的に表される。

$$\mu_i = c_i^2 \omega_{ri}^2 / 2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

μ_i は, 観測期間 T において系統に印加されたじょう乱エネルギーのモード q_i に分配されるエネルギーに相当している。従って, 大きな μ に対応する固有モードの振幅は, それ以外のモードよりも期間 T において大きいことになるので, μ の大小から優勢モードを同定できる。本論文では, μ をモードエネルギーと呼び, オンライン安定性評価指標として利用できることを第4章で述べている。

〈3.2〉 シミュレーションによる優勢モードフィルタの検証 上述した優勢モード分布推定法の妥当性を, 図2の3機系統モデルのシミュレーションにより

図3 シミュレーションによって得られた回転子速度揺らぎ

Fig. 3. Rotor speed fluctuations obtained by the simulation.

表 2 DMF によって推定されたモード分布 ν
Table 2. Estimated mode profiles ν by the DMF.

観測期間 T (se)	発電機 No.	推定固有ベクトルと μ		
		0.565 Hz	1.373 Hz	0 Hz
1.0	# 1	0.420	0.970	0.577
	# 2	0.890	-0.240	0.577
	# 3	-0.160	-0.030	0.577
	μ (%)	7.3	92.3	0
3.0	# 1	0.695	0.915	-0.577
	# 2	0.703	-0.403	-0.577
	# 3	-0.151	-0.0005	-0.577
	μ (%)	89.5	10.5	0
60.0	# 1	-0.735	0.900	-0.577
	# 2	-0.662	-0.436	-0.577
	# 3	0.148	0.005	-0.577
	μ (%)	78.9	21.1	0

検証している。図 3 は、3 機モデルにおける発電機回転子角速度の揺らぎを示している。揺らぎの生成に用いたじょう乱は、定常マルコフ過程に従って発生させたランダム負荷変動である。表 2 は、提案手法を図 3 の揺らぎデータに適用して求めたモード分布 ν の推定値である。データのサンプリング時間 Δt は、0.1 s である。表中に示した μ は、各モードエネルギーの全振動エネルギーに対する割合を示している。ここでは、揺らぎデータの観測期間 T によるモード分布の推定精度を調べるため、 $T=1.0, 3.0, 60$ s の 3 ケースについてモード分布を求めている。表 1 の真のモード分布と揺らぎから推定された分布を比較してみると、1.0 s のデータ長は分布の推定に不十分であるが、3.0 s でほぼ正確なモード分布が推定されることがわかる。60 s 間のデータを用いた場合には、真のモード分布とほとんど等しい分布が得られている。表 2 の 0 Hz モードに対応するエネルギーがすべてのケースにおいて 0% となっているが、これは (3) 式に示したように、0 Hz モードの変化に一致する慣性中心の変動が揺らぎデータに含まれていないためである。ただし、揺らぎデータに 0 Hz モードに関する変動が含まれていなくとも、このモードの分布が正確に推定できるのは、0 Hz モード分布が常に R の固有ベクトルとなっているからである。この事実は、力学における運動量保存の法則から導かれる。図 4 は、(9) 式を用いて抽出した各固有モード成分である。1.0 s の場合、二つの動揺モードは完全に分離されていないが、3.0 s の場合、各モード成分がほぼ完全に分離して抽出されている。これは、モード分布の推定精度と関係している。第 4 章で論じるように、完全に分離されたモード成分は PSS の制御信号として利用できる。

図 4 DMF によって抽出されたモード成分
Fig. 4. Mode components extracted by the DMF.

4. 優勢モードフィルタの系統監視・制御への応用可能性

〈4・1〉 オンライン安定性監視 一般に、制動力の低下や母線電圧の異常低下に伴う同期化力の減少により系統が定態的に不安定になると、優勢モードは持続・発散傾向になる。その結果、そのような状態では、正常時のモードエネルギー μ よりも大きな値の μ が観測されることになる。従って、文献 (4), (5) において論じているように、 μ の時間推移を監視することにより系統が不安定状態に移移していく兆候を事前に察知できる可能性がある。また、電圧低下に伴う定態的不安定性は、同期化力の減少によって発電機間の動的結合が弱くなるためと考えられるので、系統状況の推移に合わせて同期化力を常時監視すれば、系統の電圧的に弱体化している部分を同定できる可能性がある。

表 3 は、図 5 に示した 3 機系統のモデルパラメータから求めた同期化力係数行列 K と回転子速度揺らぎから推定した同期力係数行列 $\hat{K}$ である。 K は、一般に、モード分布 ν 、モードの動揺角周波数 ω_r と次式の関係にある。

$$K = MV\Omega V^{-1} \dots \dots \dots (11)$$

ただし、 V : (2) 式の変換行列 V , $\Omega = \text{diag}[\omega_r^2]$

表 3 に示した $\hat{K}$ は、DMF から推定したモード分布 ν

表 3 モデルパラメータから求めた同期化力
行列 K と DMF から推定した $\hat{K}$
Table 3. Exact synchronizing power matrix
 K and estimated matrix $\hat{K}$ by the DMF.

(a) 正常な電圧分布の場合

	K_n			$\hat{K}_n$		
	# 1	# 2	# 3			
# 1	2.61	-1.48	-1.13	2.45	-1.54	-0.90
# 2	-1.30	28.18	-26.88	-1.54	37.75	-36.21
# 3	-1.00	-27.14	28.24	-0.90	-36.21	37.12

(b) 母線 # 9 の電圧が10%低下した場合

	K_a			$\hat{K}_a$		
	1.35	-0.84	-0.51	1.66	-1.34	-0.32
	-1.31	23.16	-21.84	-1.34	31.37	-30.03
	-0.92	-24.61	25.53	-0.32	-30.03	30.35

図 5 DMF による同期化力同定法の説明
モデル

Fig.5. System model for explanation of
synchronizing power identification by the
DMF.

と文献(5)の方法から得られるモード周波数 ω_r を(11)式に適用することによって求められる。ここで、文献(5)におけるモード周波数 ω_r の推定法は、概略次のように述べることができる。すなわち、回転子角揺らぎ $\Delta\delta$ の共分散行列の固有値がモード振幅 c_i の2乗 ($c_i^2/2$) に相当し、これと(10)式の μ から ω_r を推定できることになる。

K_n , $\hat{K}_n$ は、図5の各母線電圧が1.0 pu 付近の正常な電圧分布における同期化力係数行列である。また、 K_a , $\hat{K}_a$ は、母線#9の負荷が重負荷傾向にあり、母線電圧が0.9 pu と10%低下している状況での同期化力である。どちらの系統状況においても、DMF はほぼ妥当な同期化力係数行列を推定している。 $\hat{K}_n$ と $\hat{K}_a$ の各要素を比較してみると、母線#9の電圧低下によって発電機#1と#3の間の同期化力が-0.90 から-0.32へと約1/3に低下しており、真の同期化力における減少をほぼ忠実に検出していることがわかる。この結果は、ネットワークにおける動的結合の弱い領域を同定するのに、提案するDMFを利用できることを示している。

〈4・2〉 事故同定 事故地点は通常、リレー情報

表 4 事故同定データベースの構成要素
Table 4. Data elements in disturbance identification data base.

事故状況	母線#8の三相地路		母線#9の1GW負荷脱落	
モード分布 v	0.943	-0.018	0.943	-0.003
	-0.242	-0.509	-0.237	-0.514
	-0.230	0.861	-0.234	0.858
μ (%)	6.87	2.24	0.25	0.04
	(75.4)	(24.6)	(87.1)	(12.9)

* どちらの事故も事故継続時間0.06秒

** μ は10秒間の揺らぎデータから推定

などを基に同定されるが、系統安定性に及ぼす影響などの事故の厳しさは、そのような開閉情報だけでは評価できない可能性がある。一方、事故の位置・大きさは、励起される動揺モードの種類やモードエネルギーの大きさに反映されているので、提案するDMFによって得られるモード分布 v とモードエネルギー μ を用いて事故の厳しさを同定できる可能性がある。DMFに基づいた事故同定は、次のような形で行われる。まず、オフラインにおける想定事故解析で、事故の位置・規模・種類とモード分布 v およびモードエネルギー μ を関係付ける事故同定データベースを構築する。次に、回転子角速度揺らぎのオンラインデータから推定されたモード分布とモードエネルギーをデータベースと照合することにより、事故点・規模・種類などを同定する。事故同定データベースの構築には、ニューラルネットワーク手法などの応用が考えられる。

表4は、事故同定データベースを構成するモード分布 v とモードエネルギー μ の一例を示しており、図5に示した3機モデルのシミュレーションから得られた結果である。母線#8の三相地絡および母線#9の負荷脱落のどちらにおいても、3機系統に存在するすべての動揺モード(この場合二つ)が励起され、その分布が推定されている。そのため、この例では、励起されるモードの種類によって事故を区別することはできないが、各モードエネルギー μ の大きさおよび割合が異なっているので、その違いから事故を識別できる。一般的多機系統では、事故の位置・規模などによって励起されるモードの種類は異なる。従って、事故同定データベースには表4に示したような事故状況とモード分布 v およびモードエネルギー μ が関係付けられて記録されることになる。もし、データベース内の母線#8の事故パターンと最も類似したモード分布およびモードエネルギーが、揺らぎデータから観測されたならば、運転員はこの母線で起きた事故の厳しさをオンラインで推定できることになろう。

〈4・3〉 安定化制御信号の生成 PSSは、系統安定性の向上を目的として、多くの発電機に設置されている。通常のPSSには、設置されている発電機の回転子速度または有効電力出力を入力信号として使用しているので、PSSは設置されている発電機に強く関連したローカルな固有モードの抑制に効果的である。しかし、弱く結合された地域間で生じるスローな動揺モード、すなわちグローバルなモードには、通常のPSSは良好な制動効果を与えることができない。この問題を解決する一つの方策として、文献(7)において、ローカルとグローバルの両方のモードの安定化に有効なHPSS(Hybrid PSS)が提案されている。このHPSSからAVRの設定点に付加される制御信号 u_s は、次式のようにローカルモード対応の制御信号 u_{ls} とグローバルモード対応の信号 u_{gs} の二つを重畳して生成される。

$$u_s = au_{ls} + bu_{gs} \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 a 、 b は各信号に対する重み係数で、 $a+b=1$ を満足するように設定する。この a 、 b の比率によって、HPSSをローカルモード重視あるいはグローバルモード重視の特性に変更することができる。

本論文で提案するDMFは、HPSSのグローバル信号 u_{gs} の生成に利用できる。また、モードエネルギー μ を用いて a 、 b を系統状況に合せて変化させることにより、HPSSに適応的な安定化能力をもたせることが可能である。すなわち、オンライン想定事故解析によって、モードエネルギー μ とモード分布 v をDMFを用いて求める。続いて、モード分布の構造から、ローカルモードとグローバルモードのそれぞれに対応するモードエネルギー μ_l と μ_g を決定し、それぞれの割合(%)を重み係数 a 、 b とする。係数 a 、 b の更新は、想定事故解析のサイクルごとに行うことになる。

5. あとがき

本論文は、発電機の回転子速度の揺らぎから、優勢モードの系統内における分布をオンラインで推定する手法(DMF)を提案している。提案手法は、同期化力の準対称性と揺らぎ共分散行列の間の物理的関係に基づいている。DMFの応用として、オンライン安定性監視、事故同定、安定化制御信号の生成について論じているが、そのほかに外部系統状況の推定にも利用可能であると考えられる。紙面の都合で可能性を述べる

にとどまったが、次の機会にその具体的な応用方法を報告したい。

(平成2年3月5日受付、同2年7月3日再受付)

文 献

- (1) 斎藤・豊田・小林・石岡：「発電電力分布が連系線潮流ゆらぎ成分スペクトルに及ぼす影響」, 電学論B, 108, 24(昭63-1)
- (2) 斎藤・豊田・石岡・小原・小林：「連系線潮流揺らぎを用いた系統制動効果の検出法」, 同上B, 109, 411(平元-9)
- (3) H. Saitoh, J. Toyoda, O. Ishioka, S. Obara & Y. Kobayashi : "Feature Extraction of Line Flow Fluctuation and Its Application to Dynamic Security Diagnosis", Proc. of IFAC'89 PSPPC, p.923(1989)
- (4) 斎藤・豊田：「常時系統ゆらぎに含まれる固有モード勢力の新しい評価指標」, 電気学会電力技術研資, PE-88-163(昭63)
- (5) 斎藤・豊田：「発電機回転子ゆらぎの相関を用いた優勢モードの推定とその応用」, 同上, PE-89-44(平元)
- (6) 例えば、奥野、他：「多変量解析法」(昭46)日科技連
- (7) M. Parsa, J. Toyoda : "Slow-Coherency Based Composite Mode Oscillatory Stabilization by means of a Hybrid PSS", IEEE 1989 Winter Power Meeting, No.89 WM 178-5 PWRS(1989)

斎藤 浩海 (正員)

博士。

昭和35年7月19日生。平成元年3月東北大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻博士課程修了。同年4月同大学工学部助手、工学

豊田 淳一 (正員)

昭和9年7月9日生。38年3月東京大学大学院博士課程修了。同年4月成蹊大学工学部電気工学科助教授。47年4月同教授、58年4月東北大学工学部電気工学科教授、IEEE, CIGRE SC 39会員。

小林 勇二 (正員)

昭和13年10月24日生。36年3月東北大学工学部電気工学科卒業。同年4月東北電力(株)入社、主に電力系統の解析・計画業務に従事。